

融合多源异构大数据的同安内涝风险评估

吴羿龙, 余 珊, 陈莹捷, 刘昕怡, 崔振飞

(福建师范大学 地理科学学院 碳中和未来技术学院, 福建 福州 350100)

摘要:随着厦门市同安区经济的发展,城市内涝对其造成的影响已不可小觑。本文基于 HEV 框架并使用 AHP 法聚焦于融合多源异构大数据作为评估因子对空间小尺度的同安进行城市内涝风险加权综合评估。结果表明,在各因子能够正确表达研究区不同的状态下,融合多源异构大数据的城市内涝风险评估模型准确性较高,对城市内涝风险评估的数据因子选择多样化具有一定的意义。

关键词:城市内涝;多源异构大数据;AHP;风险评估;同安

中图分类号:P237 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-5867(2025)04-0070-04

Risk Assessment of Waterlogging by Fusing Multi-source Heterogeneous Big Data in Tong'an

WU Yilong, YU Shan, CHEN Yingjie, LIU Xinyi, CUI Zhenfei

(School of Geographical Sciences, School of Carbon Neutrality Future Technology,
Fujian Normal University, Fuzhou 350100, China)

Abstract: With the economic development of Tong'an District in Xiamen City, the impact of urban waterlogging cannot be underestimated. This article focuses on the spatial small-scale weighted comprehensive evaluation of urban waterlogging risk in Tong'an District using the HEV framework and the AHP method, with the integration of multi-source heterogeneous big data as the evaluation factor. The results show that when the various factors can correctly express the different states of the study area, the accuracy of the urban waterlogging risk assessment model that integrates multi-source heterogeneous big data is higher, and the diversification of data factor selection in urban waterlogging risk assessment is meaningful.

Key words: urban waterlogging; multi-source heterogeneous big data; AHP; risk assessment; Tong'an

0 引言

随着厦门市“岛内大提升、岛外大发展”战略的深化,位于岛外的同安区的重要性逐渐显现。然而,夏秋季节的台风和强对流天气引发的内涝对该区域发展带来严重威胁,使城市内涝预警与应急管理面临巨大挑战^[1]。因此,进行同安区内涝风险评估以降低其灾害损失显得至关重要。截至目前,众多学者已开展了不同城市的评估工作,采用了多种方法和数据来源^[2-5]。但目前,针对城市内涝灾害的多源异构大数据融合应用仍较为稀缺^[6-7]。本研究旨在设计一套融合多源异构大数据的同安区城市内涝风险评估体系,对同安进行城市内涝风险评估,探究融合多源异构大数据在较小研究空间尺度上的应用潜力。

1 数据与方法

1.1 研究数据

本次城市内涝风险评估所需的数据采集时间主要在 2018 年前后,类型分为四大类:一是研究区的基础地理数据,包括同安区的行政区划、路网、水系等;二是研究致灾因子时所需的数据,有 DEM、土地利用类型、降水量数据等;三是研究暴露因子所需的数据,内容包括百度地图热力图、百度地图实时路况、夜间灯光遥感影像等,其中百度地图热力图和百度地图实时路况属于多源异构大数据,是本研究的新尝试;四是研究脆弱因子性所需的数据,包括消防站和避难所的 POI。本次研究的流程如图 1 所示。

1.2 研究方法

1.2.1 指标体系构建

目前,城市内涝评估方法主要有 3 种:基于历史灾情数

收稿日期:2023-03-06

基金项目:福建师范大学 2023 年大学生创新训练计划项目(CXXL-2022355)资助

作者简介:吴羿龙(2002-),男,福建省厦门人,地理信息科学专业在读本科生。

通信作者:余 珊(1967-),女,福建古田人,副教授,硕士,2006 年毕业于福建师范大学自然地理学专业,主要从事地理信息系统应用开发方面的教学和科研工作。

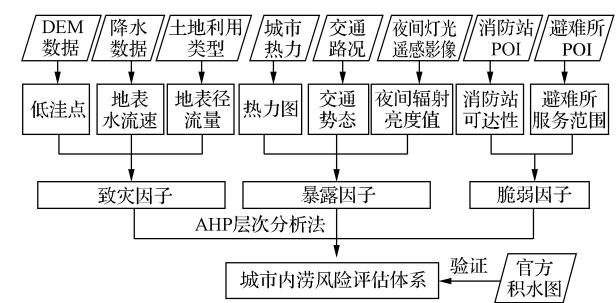


图 1 基于多源异构大数据与 AHP 的城市内涝风险评估流程

Fig. 1 The Process of urban waterlogging risk assessment based on multi-source heterogeneous big data and AHP

理统计的城市内涝风险评估、遥感图像和 GIS 技术耦合分析的城市内涝风险评估与基于指标体系评估法的城市内涝风险评估法^[8]。为了使多源异构大数据更好地应用于城市内涝灾害研究,选择指标体系评估法,尝试选用两个多源异构大数据作为因子,结合其他传统数据对同安进行城市内涝风险评估。

尹占娥等^[9]认为联合国 1991 年提出的风险概念模型表达式能够较好地反映城市自然灾害风险系统特征。其表达式为:

$$Risk(风险) = H \times E \times V \tag{1}$$

式中, H 为致灾因子,即区域内可能发生的自然灾害; E 为暴露于自然灾害风险下的要素; V 为暴露要素的脆弱性。

本文中 H 因子的来源主要为一个由地表水流速、地表径流量、低洼点 3 项指标构成的内涝发生致灾因子模型; E 中涵盖的要素被为城市不同区域的人口聚集度、发展程度和重要程度,其代表了某个区域在遭受内涝灾害时可能造成生命财产损失的上限;由于数据上的限制,因此在所设计的城市内涝风险评估模型中, V 指代脆弱因子,其主要与消防可达性、避难所服务范围挂钩,主要用于评价某个区域受灾时财产损失的难易程度和应对能力。

可见,HEV 模型是运用 3 个指标对风险进行评价的方法,属于综合评价法。由于引发城市内涝的机理复杂,受来自不同方面的各种因素所影响,并且各个因子对总体影响程度不一,因此需要在综合评价法的基础上引入权重。

加权综合评价法(WCA)是假设由于指标 i 量化值的不同,而使每个指标对于特定因子 j 的影响程度存在差别,用公式表达为:

$$C_{ij} = \sum_{i=1}^m Q_{ij} W_{ci} \tag{2}$$

式中, C_{ij} 是评价因子的总值; Q_{ij} 是对于因子 j 的指标 i ($Q_{ij} \geq 0$); W_{ci} 是指标 i 的权重值($0 \leq W_{ci} \leq 1$); m 是评价指标个数。加权综合评价法综合考虑了各个因子对总体对象的影响程度,是把各个具体指标的优劣综合起来,用一个数量化指标加以集中,表示整个评价对象的优劣。

1.2.2 最小评估单元与风险等级确定

在进行指标等级的划分前,需要首先确定研究区域的最小评估单元。它是评估的基本单位,对最终的评估结果有直接影响。一般城市社区尺度评估要求最小评估单元为 5 m

以下,城市区级尺度的评估单元的精度为 5—30 m,市级尺度的评估为 30—250 m,国家尺度的评估为 0.5°或 1°。

为了细化研究区域内不同地点受到的多种因素的影响,同时考虑到所获取的研究区域数据源最小分辨率为 30 m 土地利用类型影像,将研究区域划分为数量众多的 30 m × 30 m 格网,单独计算每个格网内的指数。同时为了统一评价标准,将获取的指标值都约束在 0—1 之间, H 、 E 、 V 3 项指标都需要进行标准化和归一化,即先分别计算 3 项指标对应的评估模型结果,划分出各自的分层指标后将结果归一化并与标准化指数相乘,用公式表达为:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max(x_{ij})} \tag{3}$$

将指标处理完后,根据数值大小,参考各项指标的重要性和出现频次进行等级划分,见表 1。

表 1 风险指数等级划分

Tab. 1 Classification of risk index levels

内涝风险指数	等级
0.0—0.15	低风险区
0.15—0.3	中低风险区
0.3—0.45	中高风险区
0.45—1.0	高风险区

1.2.3 风险因子权重

本文总结前人研究成果与经验,选用层次分析法通过标准化处理方法分别对各个影响因子的权重系数以及规范化数值,并结合加权综合评价法对各个因子指标进行综合评估进行计算。城市内涝风险评估指标的权重由层次分析法计算得出的结果见表 2。

表 2 城市内涝风险评估指标权重计算结果

Tab. 2 Calculation results of weights of indicators for urban waterlogging risk assessment

目标层	权重	准则层	权重	方案层	权重
城市内涝 风险评估	1.000	致灾因子	0.776 59	低洼点	0.570 94
				地表水流速	0.045 12
				地表径流量	0.160 53
				城市热力	0.099 58
	暴露性	0.153 04	交通态势	夜间灯光辐射亮度值	0.019 41
				消防可达性	0.058 64
				避难所服务半径	0.011 73

2 风险分析

2.1 致灾因子分析

城市内涝致灾因子是用于衡量一个区域在某种连续的气象变化规律下,特定的时段内(以 2018 年为例)发生降水

并产生内涝积水的风险指标。其主要的评估因子为研究区域的地表径流、集水点与地表水流速。

2.1.1 集水点分析

一般而言,易积水区域是一个在某范围内海拔处于极低值的区域,即洼地。当降雨发生时,该地区会受到四周高地水流在重力作用下移动的影响,形成积水。由于市政管网的分布属于保密信息,因此,本文中的易积水区并没有考虑评估区域的排水能力,仅仅通过 DEM 数据进行计算进行填洼处理,再将填洼后的栅格数据与填洼前栅格数据相减而获取的。

2.1.2 地表水流速分析

地表径流流速是评价内涝风险的重要指标之一^[10]。降落到地面并形成径流的雨水,在受到坡度与重力作用的影响下会形成由高处向低处的水流。当地表径流量较大时,在坡度作用下会形成具有破坏力的洪流,造成经济财产损失。因此采用一个简化后的、仅考虑加速度的、基于物理原理的水动力模型来评估地表径流流速,见式(4):

$$\text{地表径流流速}(R_v) = V_0 + \sqrt{2R_s \times R_a} \quad (4)$$

其中 V_0 为该栅格像元的地表径流流速初速。对于地表径流非初始点像元而言,该像元的流速初速(V_0)为其流向上游像元的末速度;雨水降落到地表的速度与雨滴大小、风向等因素都存在关系,由于不具备详细统计降水雨滴大小的条件,此处模型降落速度被简化为 5 m/s。因此,对于形成径流的上游初始点,流速用公式表示如下:

R_s 为地表径流流动的坡长,用公式表示为:

$$\text{径流初始流速}(V_0) = 5 \times \cos(90^\circ - \text{slope}) \quad (5)$$

R_s 为地表径流流动的坡长,用公式表示为:

$$\text{地表径流流动坡长}(R_s) = \frac{DEM}{\sin\left(\frac{\text{slope} \times \pi}{180}\right)} \quad (6)$$

R_a 则是地表径流加速度,用公式表示为:

$$\text{地表径流加速度}(R_a) = g \times \sin(\text{slope}) \quad (7)$$

式中,DEM 表示为高程大小;slope 表示坡度大小。

2.1.3 地表水流速分析

作为城市内涝的主要影响因素之一,降水量数据对于分析城市内涝有显著的影响,因此,获得具有高可信度的连续空间降水数据具有重要意义。

由于获取的降水数据均为点值,为了便于后期进行栅格计算,基于 DEM 的协同克里金法插值计算方法,将点状分布的降水数据插值为连续空间降水。之后,将插值后的降水数据转换为实际汇集于地表的地表径流数据。在降水作用过程中,存在蒸散发、下渗等多种方式的作用,导致降水量与实际地表径流并不相等^[11]。出于计算便利和数据简化,采用得到主流认可的“双评价指南”的模型。在该模型中,地表径流量由降雨量与平均地表径流系数相乘所得,即:

$$\text{地表径流量}(R_i) = P_i \times \alpha \quad (8)$$

式中, α 所代表的平均地表径流系数按照地表生态系统类型计算。由于厦门市同安区缺少公开的、具有可信度的地表径流系数,因此采用自然资源部于 2019 年发布的《双评价指南(征求意见稿)》中提出的各生态系统类型平均地表径流系数。根据厦门市同安区人民政府公开的自然资源数据,

同安区海拔 300 m 以下分布的森林植被多为常绿阔叶林,300—800 m 多分布常绿针叶林,灌丛皆为常绿阔叶灌丛,草地类型以稀疏草地为主。依据这些主要的生态系统类型数据,代入计算后得到地表径流量数据。由于厦门市政府并未对外公开管网分布信息,缺乏计算径流汇流至管网流量的必要数据,因此此处获得的地表径流量为仅经过地表下渗作用后的流量。

2.2 暴露性分析

上文提到的致灾因子主要使用的是常规的矢量与栅格数据,它们属于多源异构数据中的空间信息数据,而暴露性因子主要由非空间信息数据构成。承载体的暴露性因子是用于确定可能暴露于自然灾害影响下的人口、财产资源和经济等要素^[12]。其中,二级因子的热力图代表人口密集程度,交通势态表示城市交通的拥堵状况,夜间灯光辐射亮度值表示经济的繁荣状况。由于热力图与交通势态属于异构非空间信息数据,为了进行进一步的计算,需要对数据进行空间化与结构化。

2.2.1 热力图

热力图描述着人群的分布与密度程度,是用不同颜色的区块叠加在地图上描述人群分布、密度和变化趋势的一种可视化方式。而当城市内涝发生时人口集聚越多的区域越容易受其影响,为此选择热力图作为城市内涝暴露性的一个因素。矢量化与配准栅格热力图并进行日均的计算,最终得热力图二级因子。

2.2.2 交通势态

当城市内涝发生时可能会使部分道路积水若干小时,甚至直接导致道路中断,这严重影响城市交通系统的正常运转。一方面,当内涝积水超过车辆排气筒的高度,那么车辆便极易熄火甚至成为泡水车、淹水车,这会给百姓造成不同程度的经济损失;另一方面,内涝会导致道路交通服务水平显著下降,特别是高峰期^[13],因此城市高峰期的易堵道路便成了内涝经济损失高风险地区。因此,选取交通势态作为城市内涝暴露性的一个因子。其中,从百度地图开放平台中获取的道路拥堵状况表信息赋值格网进行计算并再将其赋给路网,即可得到交通势态二级因子。

2.2.3 夜间灯光辐射亮度

城市灯光标志着人口与经济活动的聚集,直接反映着当地的工业化水平和城市化水平。夜间灯光强度与我国经济发展具有较高相关性,其空间分布特征可以在一定程度上直观地了解某个特定地区的内部小尺度的经济发展情况。为此,选取夜间辐射亮度作为城市内涝暴露性的一个因子。其中,需要对珞珈一号获取的夜间灯光遥感影像进行辐射校正预处理流程^[14]才能将其作为因子使用。

2.3 防灾能力因子分析

消防站可达性与避难所服务范围分析,城市内涝常导致人员伤亡、财产损失,且限制应急服务响应能力,增加救援及疏散难度。因此,消防站与避难所位置对防灾能力至关重要。本研究选取消防站可达性及避难所服务范围作为内涝防灾能力因子。鉴于同安区消防站与避难所 POI 点数量有限,为增强指标可靠性,综合考虑建筑设施公共性与高度,筛选相关 POI 点以增密避难所分布。最终,结合处理后的

OSM 道路数据生成路网数据及 POI 点数据,进行服务范围与可达性求解。

3 同安城市内涝风险评估结果分析

根据 AHP 法得出的权重设定的模型与参数如下:

$$Risk(\text{城市内涝风险}) = 0.776\ 59 \times H + 0.153\ 04 \times E + 0.070\ 37 \times V \quad (9)$$

式中, H 、 E 、 V 分别为致灾因子、暴露因子、脆弱因子 3 个因子归一化后的数值。代入模型、载入数字化后的官方易涝点后,得出同安区城市内涝风险图(如图 2 所示)。

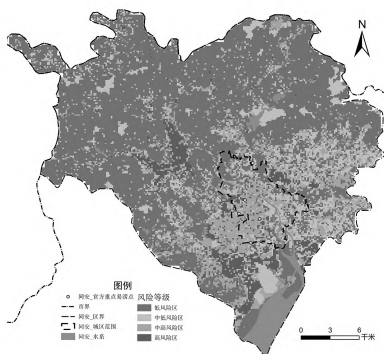


图2 同安区城市内涝风险图

Fig. 2 Urban waterlogging risk map of Tong'an district

由图 2 可见,同安区城市内涝中高风险以上的区域主要分布在城区内部、城区周围及西南部的同安新城。而同安的官方重点易涝点,虽然没有全部都处在城区范围内,但至少分布在城区的边缘,且均落在城市内涝中高风险区及以上,其中,落在高风险区的重点易涝点有 2 个,落在中高风险区的有 4 个,说明融合多源异构大数据的城市内涝风险评估模型准确性较高。

4 结束语

城市内涝机理复杂,受众多因素影响,难以全面考察。本研究选取厦门市同安区作为较小空间尺度研究对象,重点探讨多源异构大数据在内涝风险评估中的应用。基于 HEV 模型,融合多源异构大数据因子,采用 AHP 法进行因子加权,构建城市内涝风险评估体系。研究发现,在因子能正确反映区域特征的情况下,该评估模型具有较高的准确性。然而,AHP 法在评估体系构建中存在一定局限性,如未考虑地理因子的相关性及专家打分的主观性等,后续研究可探讨引入新方法以克服 AHP 法的局限性,进一步提高评估的准确性和可信度。

参考文献:

- [1] 张冬冬,严登华,王义成,等.城市内涝灾害风险评估及综合应对研究进展[J].灾害学,2014,29(1):144-149.
- [2] 赵越,张斌,王新亮.城市建成区内涝风险评估及对策研究:以天津市南开区为例[J].景观设计,2019(3):12-19.
- [3] 于磊,黄瑞晶,李宝,等.基于层次分析法的北京城市副中心内涝风险评估[J].北京师范大学学报(自然科学版),2022,58(1):62-69.
- [4] WANG Y,ZHAI J,SONG L. Waterlogging risk assessment of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in the past 60 years [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2021, 145(3-4): 1 039-1 051.
- [5] LIN T,LIU X,SONG J,et al. Urban waterlogging risk assessment based on internet open data: A case study in China [J]. Habitat International, 2018, 71:88-96.
- [6] 梁庆发,梁志宇,郑国珊.基于 GIS 的多源异构数据整合方法研究[J].测绘与空间地理信息,2015,38(6):144-146.
- [7] 吴先华,肖杨,李廉水,等.大数据融合的城市暴雨内涝灾害应急管理述评[J].科学通报,2017,62(9):920-927.
- [8] 李瑶,胡潭高,潘晓骏,等.城市内涝灾害模拟与灾情风险评估研究进展[J].地理信息世界,2017,24(6):42-49.
- [9] 尹占娥,许世远,殷杰,等.基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J].地理学报,2010,65(5):553-562.
- [10] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等.福州晋安河片区海绵改造对城市内涝的影响[J].水资源保护,2023,39(1):83-92.
- [11] 邓金运,刘聪聪.不同土地利用类型下城市内涝风险及损失评估[J].安全与环境学报,2018,18(6):2 293-2 299.
- [12] 尹占娥,许世远,殷杰,等.基于小尺度的城市暴雨内涝灾害情景模拟与风险评估[J].地理学报,2010,65(5):553-562.
- [13] 梅超,陈宇枫,刘家宏,等.基于情景模拟的城市内涝对道路交通的影响评估[J].水资源保护,2022-38(6):31-38.
- [14] 徐嘉源.基于珞珈一号夜间灯光数据的珠三角地区 GDP 空间化研究[D].广州:广东工业大学,2020.

[编辑:任亚茹]

本刊现入编“万方数据——数字化期刊群”和“中国核心期刊(遴选)数据库”,作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付,不再另行发放。作者如不同意将文章入编,投稿时敬请说明。